第40卷 第4期
2023年4月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 4
Apr. 2023

人类活动对秦岭月河流域径流变化的影响分析

段雨佳[1,2]， 何 毅[1,2]， 赵 杰[1,2]， 吴 琼[1,2]

(1. 西北大学城市与环境学院,陕西 西安 710127；2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,陕西 西安 710127)

摘 要：气候变化和人类活动是河川径流变化的主要驱动力。在相似气候的前提下,人类活动是流域径流变化的主导因素,定量识别人类活动对径流变化的作用机制对深入探究径流的变化特征具有重要意义。本研究以秦岭月河流域为研究对象,基于流域内水量平衡的基本原理,在相似气候的前提下,结合土地利用/覆被变化(LUCC)和归一化植被指数(NDVI)的变化,分析月河流域的径流变化来量化人类活动对径流的影响程度。结果表明:(1) 1960—2018年流域内径流量的平均值为8.3×10^8 m^3,径流整体呈现出减少的趋势,变化趋势不显著。(2) 在相似气候的前提下,本研究共得出6组气候相似年组,其中有3组年径流量增加,2组年径流量减少。(3) 以第3组相似年组(2000年和2016年)为例来定量区分气候变化和人类活动对流域径流的影响,2016年与2000年相比,径流减少了4.7×10^8 m^3。(4) 在第3组相似年组的时段内有25751.4 hm^2的耕地转化为林地,林地面积增加了24998.9 hm^2。(5)NDVI的变化主要是由于人类活动所致,同一时段内NDVI增加的面积为242652.0 hm^2,NDVI的变化趋势与径流量变化趋势相反。本研究可为分析人类活动对秦岭河川径流变化的影响提供理论依据。

关键词：月河流域；人类活动；相似气候条件；LUCC；NDVI

河川径流作为水循环过程的核心环节和水资源的重要组成部分,从多方面推动着自然生态系统的发育与演化[1],因此研究影响径流变化的主要驱动因素是全球水资源预测的关键,也是维持淡水资源可持续利用的基础[2]。近年来,在气候变化和人类活动的双重影响下,许多河川径流发生了较为明显的变化。研究流域径流变化的原因,从发生变异的水文要素中分离出两种因子的贡献量成为当前流域水文研究的热点和难点[3]。Mu等[4]研究指出,剧烈的人类活动影响已导致黄河径流改变;Bao等[5]基于海河流域的研究发现,强烈的人类活动干扰会导致流域的下垫面特征剧烈变化,在一定程度上改变流域的产汇流过程;郭文献等[6]研究乌江流域发现,人类活动如修建水利工程等会对径流进行一定的调节,进而改变径流原有的时空分布;郭爱军等[7]对渭河流域的研究表明,在径流变化的各影响因子中,人类活动的作用处于主导地位,而气候变化的影响呈不明显的增加趋势。因此综合探究径流的变化特征并分析人类活动对径流的作用机制具有极其重要的意义。

目前,区分气候变化的自然过程和人类活动对径流影响的研究还在广泛的探索中[8],最常用的几种区分气候变化和人类活动对径流影响的方法主要包括:基于Budyko假设的弹性系数法[9]、水文模型法[10]、分项调查方法[11]以及配对流域分析法[12]等。弹性系数法虽然应用广泛,但其偏导部分计算方法多样,导致偏导值不一,因此计算结果会产生一定误差[13];水文模型法参数较多,具有较强的物理机制,但建模及率定参数困难,不确定性强[14];分项调查法的研究思路是根据水量平衡方程将流域内的各种水文参数计入到实测径流中,但该方法需要大量详实的用水数据及相应人类活动的影响定额,难以全面考虑所有人类活动对流域水文过程的扰动,不能保证还原结果的可靠性;配对流域分析法通过参考流域与试验流域的对比来分析人类活动对径流产生的影响,但这种方法成本较高,且只

收稿日期：2022-03-29； **修订日期：**2023-01-06
基金项目：中国南北过渡带综合科学考察(2017FY100904);陕西省大学生创新创业训练计划项目(S202110697353)
作者简介：段雨佳(2000-),女,主要从事生态水文研究. E-mail: duanyujia@stumail.nwu.edu.cn
通讯作者：何毅. E-mail: yihe@nwu.edu.cn

适用于小流域[15]。此外,王飞等[16]提出了确定相似气候前提的方法,即通过分析降雨和蒸发的数量和过程相似的不同时段间径流量和输沙量变化来定量区分气候变化和人类活动对黄河唐乃亥水文站以上的流域(黄河河源区)径流的影响,该方法能定量的区分气候变化和人类活动对河川径流的影响。秦巴山区地处我国南北过渡地带,是南水北调中线水源地,河川径流变化对气候变化敏感。因此,本研究以地处秦岭南坡的月河流域为研究区,基于水量平衡的基本原理,确定出相似气候年组,通过分析降雨和蒸发的数量和过程均相似的年组内径流量的变化,结合LUCC和NDVI的变化对气候变化和人类活动对径流的影响进行研究,以期定量分析人类活动对月河流域径流变化的影响程度。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况

月河发源于秦岭南麓凤凰山主峰铁瓦殿(图1),河长112.6 km,流域控制面积2826 km^2,河道比降2.8‰,为长江支流汉江北岸的一级支流。月河北部为秦岭山区,中部为川道、丘陵区,南部为巴山区,中部地势最低。该流域多年平均气温为15.1 ℃,四季分明。受温带大陆性气候的影响,流域内降雨量的变化有较为明显的差异,多年平均降雨量在826.5~879.6 mm之间,无霜期较长[17]。月河流域水系发达,河网密布,主要一级支流共41条,长枪铺水文站是月河流域把口水文站(图1)。

1.2 数据来源

气象数据基于月河流域及其周边的镇安、旬阳、安康、石泉、宁陕、汉阴、紫阳共计7个气象站点,时间跨度为1960—2018年,来源于国家气象科学数据中心(http://www.cma.gov.cn/)。在此基础上本研究利用FAO56 Penman-Monteith公式计算出潜在蒸发量,并运用反距离加权空间插值法对降雨量和潜在蒸发量进行插值分析,获取月河流域平均降雨量和平均潜在蒸发量。流域逐月径流量数据采用1960—2018年长枪铺水文站的实测径流资料。土地利用/土地覆盖(LUC)数据来源于中国区30 m分辨率土地利用分类数据——Landsat衍生的年度土地覆盖产品(CLCD)[18],LUC分为草地、耕地、灌木、不透水面、林地、水体6种。归一化植被指数(NDVI)数据集来源于中国年度植被指数空间分布数据集、中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(http://www.resdc.cn/DOI),研究时段为2000

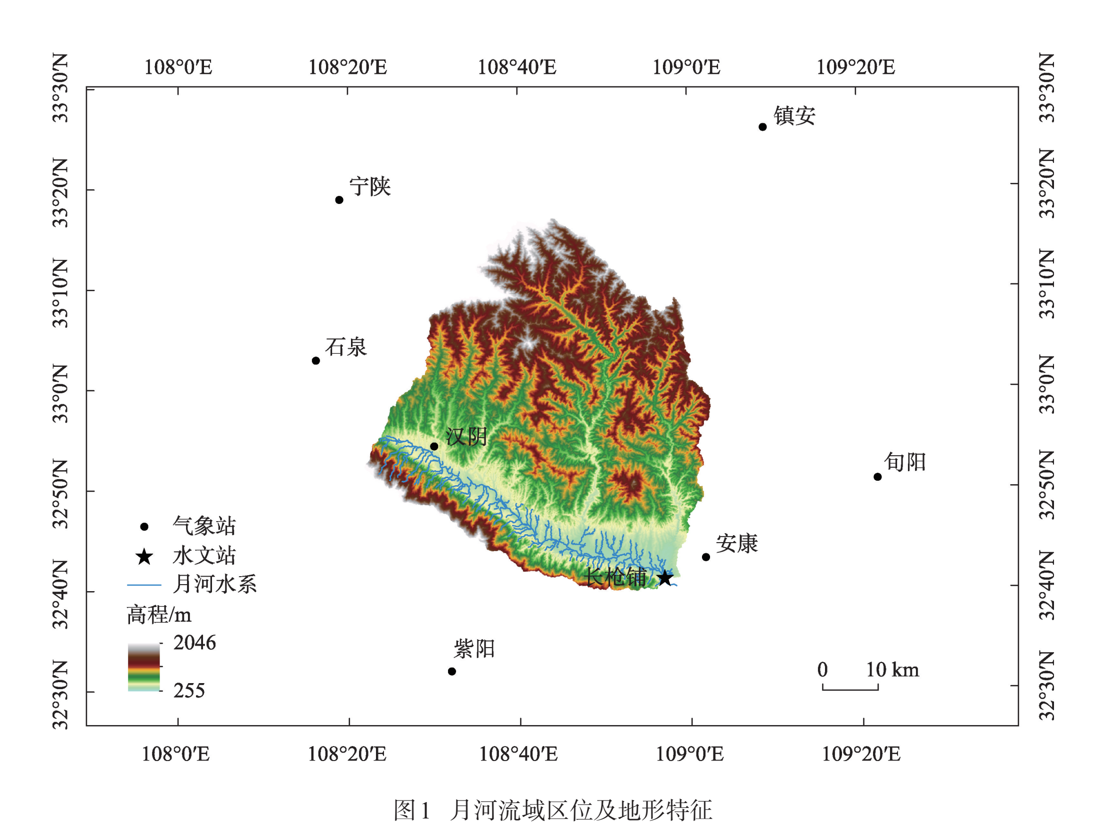


图1 月河流域区位及地形特征

Fig. 1 Location and topographic characteristics of Yue River Basin

年8月—2016年8月，时间分辨率为1月，空间分辨率为1 km。

1.3 研究方法

1.3.1 基本原理 流域内水量平衡方程：$P-ET_0=R+W_{ground}+W_{soil}$是本研究的基本原理。式中：$P$为流域内降雨量；$ET_0$为流域内潜在蒸发量；$R$为流域内地表径流量；$W_{ground}$为流域内地下储水量；$W_{soil}$为流域内土壤储水量。径流的变化由下垫面和气候因子共同驱动。当流域内降雨量和蒸发量平衡时，径流量的变化主要是由下垫面性质的变化引起的。在较短时间尺度内，地形等影响因子演变缓慢，因此人类活动是改变流域内下垫面性质的主导因素[19]。降雨量和潜在蒸发量包括了气温、湿度、风速和日照等气候因素，所以在降雨和潜在蒸发相似的前提下可以将人类活动对流域内径流量变化的影响进行深入分析。

1.3.2 计算潜在蒸发量 利用联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations)推荐的Penman-Monteith公式[20]，计算各气象站点的潜在蒸发量。Penman-Monteith公式为：

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_a-e_d)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \quad (1)$$

$$R_n=0.77R_s-2.45\times10^{-9}(0.1+0.9y/Y)(0.34-0.14\sqrt{e_d})(T_{kx}^4+T_{ky}^4) \quad (2)$$

$$R_s=(\alpha+\beta Y)R_a \quad (3)$$

式中：ET_0为潜在蒸发量($mm\cdot d^{-1}$)；R_n为地表净辐射通量($kJ\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)；$G$为土壤热通量($MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$)，相对于$R_n$很小，因此可以忽略；$\gamma$为干湿表常数($kPa\cdot ℃^{-1}$)；$T$为日平均气温(℃)；$u_2$为2 m高度处的风速($m\cdot s^{-1}$)；$e_a$为饱和水气压(kPa)；$e_d$为实际水气压(kPa)；$\Delta$为饱和水气压与温度关系曲线斜率($kPa\cdot ℃^{-1}$)；$R_s$为地表短波辐射通量($MJ\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)；$R_a$为大气外层辐射通量($MJ\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)；$T_{kx}$为日最高温度(K)；$T_{ky}$为日最低温度(K)；$\alpha$为阴天短波辐射通量与大气外层辐射通量的比例系数；$\alpha+\beta$为晴天短波辐射通量与大气外层太阳辐射通量的比例系数；y为实际日照时间(h)；Y为理论日照时间(h)。

计算各气象站点的逐月潜在蒸发量，并对其累计得到逐年潜在蒸发量。

1.3.3 确定相似年组 气候变化和人类活动是流域径流变化的最主要的影响因子。在相似气候的前提下，流域径流变化主要是由人类活动引起。本研究确定的相似年组包括数量相似年组和过程相似年组[21]。考虑到人类活动的连续性等原因，本研究的相似年组年差定于5 a及其以上。根据已有研究[22]将流域平均降雨量和平均潜在蒸发量之差均小于2%的2 a作为数量相似年组，将数量相似的年组内平均降雨量和平均潜在蒸发量的线性相关达到1%及其以上的定为过程相似年组，满足数量相似与过程相似的年组即所求相似年组。

1.3.4 LUCC分析 土地利用/覆被变化(LUCC)是影响流域水量平衡及水文循环过程的关键因素之一[23]。LUCC通过改变地表蒸散发、土壤水分的下渗能力和植被的截留等，直接或间接影响流域水循环。计算月河流域耕地、林地、灌木、草地、水体和不透水面6种类型的土地面积，以显示月河流域研究时段内土地利用的变化过程。土地利用转移矩阵用于展示土地转移的动向情况和数量结构，能够定量描述研究时段初期与末期研究区各类土地类型面积相互转化的动态信息[24–25]。基于LUCC地图，通过土地利用转移矩阵来说明2000—2016年时段内月河流域土地利用和覆盖的变化情况。

2 结果与分析

2.1 气象要素统计结果分析

2.1.1 年降雨量和年潜在蒸发量变化趋势 秦岭南坡月河流域1960—2018年的流域内年降雨量和年潜在蒸发量的平均值分别为912.6 mm和873.1 mm，变差系数分别为0.173和0.064，说明降雨量和潜在蒸发量的年际变化较小。研究时段内月河流域年际降雨量的数值变化呈增加趋势，线性拟合增率为6.1417 $mm\cdot(10a)^{-1}$。年潜在蒸发量的数值变化呈减少趋势，线性拟合减率为8.1147 $mm\cdot(10a)^{-1}$。潜在蒸发量的年际变幅大于降雨量的年际变幅，但二者变化均未达到显著性水平(图2)。

2.1.2 降雨量和潜在蒸发量年内变化 基于月河流域逐月降雨量和逐月潜在蒸发量的插值结果，计算所得研究区1960—2018年多年平均月降雨量和月潜在蒸发量年内的分布情况如图3所示。月河流域降雨量年内分配不均匀且比较集中，降雨大多集中在4—10月，最大降雨量出现在7月，多年平均值为176.6 mm，最小降雨量在1月出现，多年平均值为4.9 mm。潜在蒸发量的年内分布情况与降雨量的年内分布情况相似，年内分配不均匀且比较集中，最

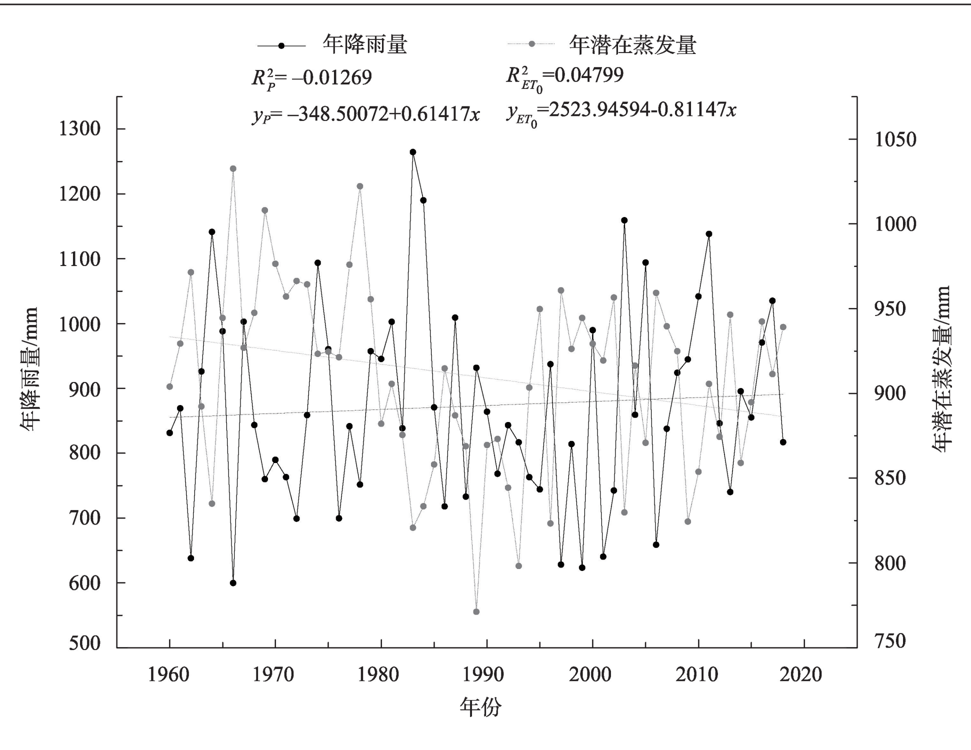


图2 月河流域逐年降雨量和潜在蒸发量变化

Fig. 2 Annual changes of precipitation and evaporation in Yue River Basin

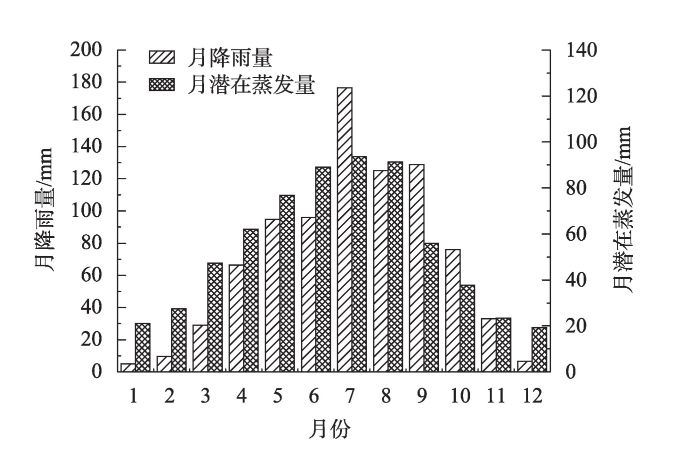


图3 月河流域降雨量和潜在蒸发量年内变化

Fig. 3 Precipitation and potential evaporation change within the year in Yue River

大值出现在7月,多年平均值为133.8 mm,最小值出现在12月,多年平均值为27.5 mm。

2.2 水文要素统计分析

由表1可知,月河流域内年径流量平均值为 8.3×10^8 m³,变差系数为0.481,说明在研究时段内月河流域径流量年际变化较大,在1964年径流量达到研究时段内径流量的最大值 19.2×10^8 m³,在1999年达到研究时段内径流量的最小值 1.7×10^8 m³,在研究时段内月河流域的年径流量整体呈现出减少的趋势,且未达到显著性水平(图4)。

2.3 相似年组的判定及年组特征

本研究确定的年差≥5 a的相似年组一共6组(表2),这6组相似年组在时间上覆盖了本研究的所有年代,年差变化从5 a到41 a,这不仅反映了研究时段内流域不同的降雨量和潜在蒸发量的变化特征,而且可以从较长时间尺度上反映出研究区流域径流量的变化,时空差异较为显著。相似年组6(1964年和2003年)的年降雨量比年平均降雨量高230 mm;在相似年组1(1973年和1968年)的降雨量接近多年降雨量的平均值。相似年组1(1973年和1968年)的潜在蒸发量比年平均潜在蒸发量高91

表1 1960—2018年月河流域气象、水文要素统计特征

Tab. 1 Statistical characteristics of hydrological elements in Yue River Basin from 1960 to 2018

特征值	平均值	中位数	标准差	最小值	最大值	变差系数
年降雨量/mm	912.6	855.1	151.4	599.8	1264.5	0.173
年潜在蒸发量/mm	873.1	923.4	59.1	771.1	1032.6	0.064
年径流量/10^8 m³	8.3	7.1	4.0	1.7	19.2	0.481

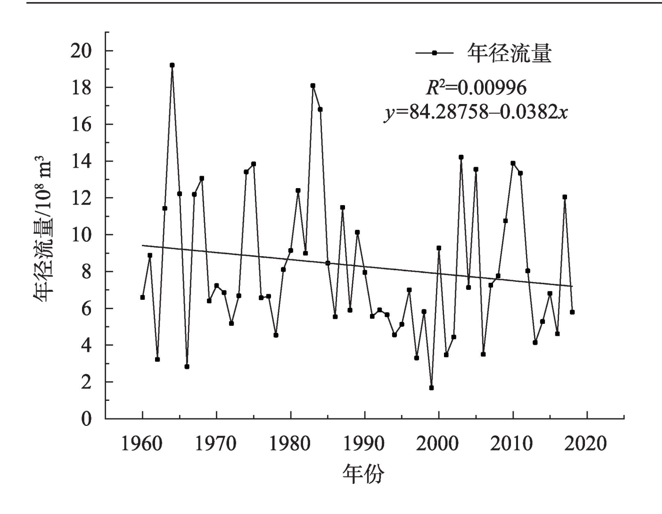


图4　月河流域年径流量变化

Fig. 4　Annual changes of runoff from 1960 to 2018 in Yue River Basin

mm；相似年组5（1982年和2012年）的潜在蒸发量接近于多年平均蒸发量的平均值。

2.4　基于相似气候前提的流域内径流量年际变化分析

在本研究的6组相似年组中，一共有3个相似年组的年径流量增加，有2个相似年组的年径流量减少（表3）。从年径流量的变幅分析，研究区域年径流量变化较为复杂。在相似气候的前提下，年组2的径流量增加幅度最大，变化值为9.2×10^8 m^3，变幅为200%。年组6的径流量减少幅度最大，变化值为−5.0×10^8 m^3，变幅为−26.0%。除此之外，相似年组1、3、4、5径流量的变化值分别为6.4×10^8 m^3、4.7×10^8 m^3、2.9×10^8 m^3、−1.0×10^8 m^3，变幅分别为95.5%、102.2%、31.2%、−11.1%。

2.5　研究区径流量变化原因分析

2.5.1　LUCC结果分析　以相似年组3（2000—2016年）为例，分析月河流域2000—2016年LUCC的变化情况（图5）和不同土地利用类型之间的转化（表4）。在2000—2016年时段内，林地和耕地是月河流域的主要土地利用类型，占总面积的97.4%以上。在该研究时段内林地面积由175744.9 hm^{2}增加到200743.8 hm^2，耕地面积由98439.7 hm^{2}减少到75808.7 hm^2。不透水面作为城市化的显著特征，对径流的增加有促进作用[26]，其面积仅增加了1783.6 hm^2。2000—2016年的土地利用变化矩阵表明，林地和不透水面增加的部分均主要来自于耕地，有26.2%的耕地转化为了林地，但仅有1.9%的耕地转化为不透水面。除此之外，有2106.4 hm^{2}的草地和1088.9 hm^{2}的灌木转化为林地。在2000—2016年时段内，林地面积和不透水面面积分别增加了

表2　降雨量和潜在蒸发量的相似年组

Tab. 2　Precipitation and evaporation of paired years

编号	相似时段			降雨量/mm		潜在蒸发量/mm	
	时段1	时段2	年差/a	时段1	时段2	时段1	时段2
1	1973年	1968年	5	858.8	843.6	964.3	947.5
2	2016年	1975年	41	970.6	960.4	942.4	924.6
3	2016年	2000年	16	970.6	989.9	942.4	929.2
4	2000年	1967年	33	989.9	1002.9	929.2	926.9
5	1982年	2012年	30	838.6	846.2	875.5	874.4
6	1964年	2003年	39	1141.3	1159.3	835.0	829.8

表3　月河流域相似年组径流量变化

Tab. 3　Changes of runoff and sediment discharge in paired years of Yue River Basin

编号	相似时段		年径流量/10^8 m^3		变化/10^8 m^3	变幅/%
	时段1	时段2	时段1	时段2		
1	1973年	1968年	6.7	13.1	6.4	95.5
2	2016年	1975年	4.6	13.8	9.2	200.0
3	2016年	2000年	4.6	9.3	4.7	102.2
4	2000年	1967年	9.3	12.2	2.9	31.2
5	1982年	2012年	9.0	8.0	−1.0	−11.1
6	1964年	2003年	19.2	14.2	−5.0	−26.0

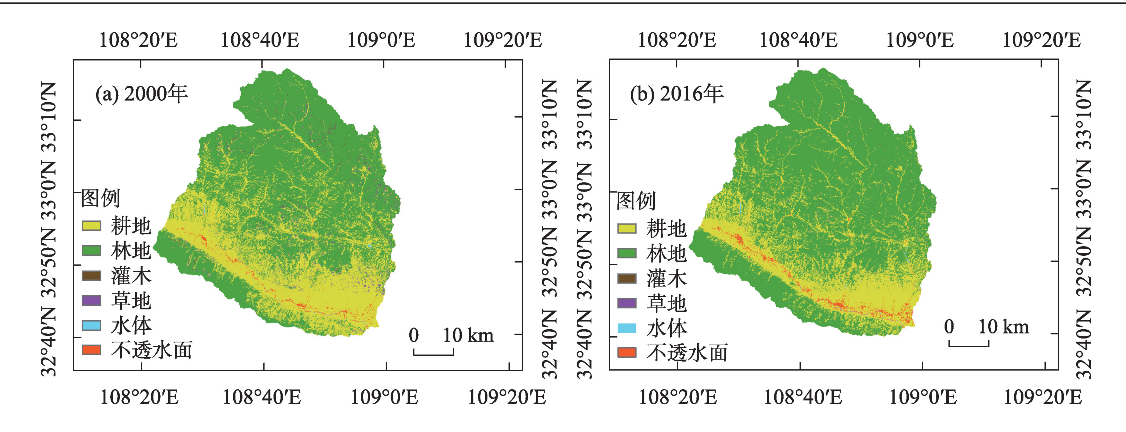


图5 2000—2016年月河流域LUCC

Fig. 5 LUCC of the Yue River Basin from 2000 to 2016

表4 2000—2016年月河流域LUCC变化矩阵

Tab. 4 LUCC matrix of Yue River Basin from 2000 to 2016 /hm²

		2016年						
	LUCC	不透水面	草地	耕地	灌木	林地	水体	2000年总计
2000年	不透水面	1798.9	–	42.0	–	–	93.9	1934.8
	草地	2.4	339.5	1219.1	26.1	2106.4	0.2	3693.7
	耕地	1892.9	199.5	70456.6	24.9	25751.4	114.6	98439.7
	灌木	–	24.7	115.2	119.4	1088.9	–	1348.2
	林地	7.2	40.5	3871.7	26.1	171795.5	3.9	175744.9
	水体	17.1	–	104.1	–	1.7	189.6	312.5
	2016年总计	3718.4	604.2	75808.7	196.5	200743.8	402.3	281473.8

24998.9 hm² 和 1783.6 hm²，而耕地面积减少了 22631.0 hm²。林地相对于耕地具有减流作用[27]，因此在该时段内，包括林地面积增加和耕地面积减少在内的集水区面积的变化均会对同时期月河流域年径流量产生抑制作用。

2.5.2 水利工程建设 水利工程的建设会改变径流的产流汇流模式、河床形态以及径流的原有规律，对流域径流产生较大的影响。截至2016年，月河流域共建成水库74座，总库容79572×10⁴ m³；塘坝1827座，总库容1380×10⁴ m³。除此之外，还有引水工程730处、提水工程220处、机电井2094眼，合计供水能力为28356×10⁴ m³，各类供水工程总供水量为21241×10⁴ m³。研究时段内月河流域年际降雨量呈现增加趋势，各类水利工程的修建是月河流域在研究时段内径流减少的原因之一[28]。月河流域建有观音河水库和黄石滩水库2座中型水库，其余均为小型水库。观音河水库于1962年建成枢纽工程。黄石滩水库位于安康市谭坝乡境内汉江二级支流付家河中游，于2000年开工建设，2007年开闸放水，总库容4177×10⁴ m³。黄石滩水库以及部分小型水库的建设使用期处于本研究所确定的相似年组的研究时段内。以相似年组2为例，该相似年组包含的2个年份的降雨量几乎相同，但年径流量变幅较大，黄石滩中型水库等水利工程的修建是该时段月河流域径流量大幅减少的主要影响因子之一。

2.5.3 研究区NDVI变化分析 植被作为重要的地理环境要素，主要受到3种因素的影响：生长地区的气候、地形和土壤以及当地的人类活动，而3种影响因素中尤以气候变化和人类活动对植被的影响最大。秦岭南坡月河流域地表土壤演变进程缓慢，因此在相似气候的前提下流域内植被覆盖的变化也主要是由人类活动引起的。NDVI是目前研究中公认的植被变化的最佳表征指标[29-30]，所以本研究中采用NDVI来作为下垫面植被变化的表征。考虑到数据的可获得性，本研究以相似年组3（2000—2016年）为例，由图6可知，在2000—2016年时段内，月河流域NDVI增加的面积为242652.0 hm²，减少的面积为39368.0 hm²，因此在2000—2016年时段内，人

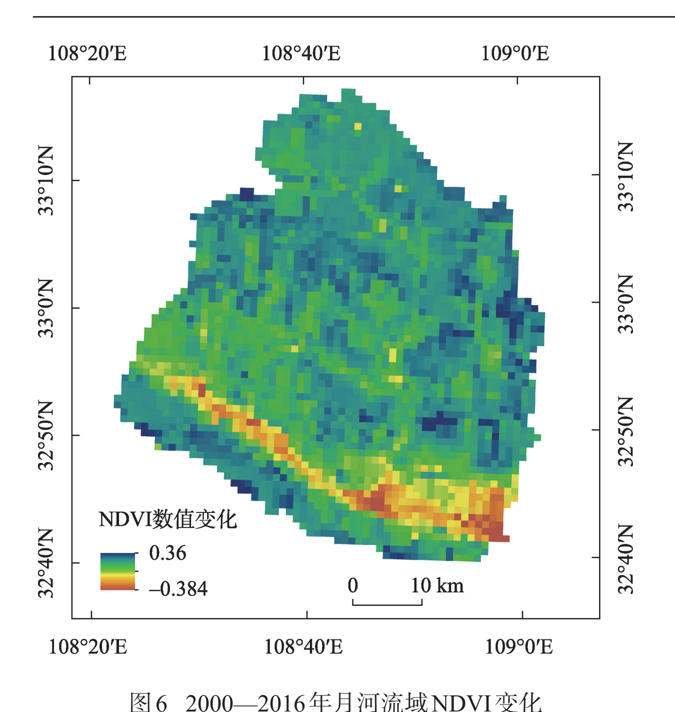


图6　2000—2016年月河流域NDVI变化

Fig. 6　NDVI change in Yue River Basin from 2000 to 2016

类活动对月河流域植被NDVI的影响均具有双重性，但总体上以正向促进作用为主，即月河流域的NDVI整体呈现出增加的趋势。由分析结果可以看出，在相似气候的前提下，流域内径流量的变化与植被覆盖程度有密切关系，随着植被覆盖度的增加，下垫面粗糙度和土壤结构改善，研究区产流的能力减弱，当地径流量呈现出减少的趋势，即二者的变化大致呈现出相反的趋势。而作为最主要的驱动因素的人类活动与NDVI的数值波动具有明显的同步性，所以该结果进一步说明了当地径流量的变化对人类活动作出了响应。

3　讨论

气候变化和人类活动均对流域径流量的变化有较大的影响。在相似气候条件下，径流会对人类活动有不同程度的响应。研究人类活动对流域径流量变化的影响程度对于保护流域及维持其周边地区生态环境的稳定具有重要的意义。国内外关于月河流域的研究主要有：水生态系统保护修复、洪水成因及特点分析、水资源优化配置等，目前关于月河流域多年径流量变化趋势的分析以及人类活动对月河流域径流量变化影响的研究较少。本文以月河流域为研究区，统计得到月河流域在1960—2018年时段内的平均径流量为8.3×10^8 m^3，这与杨晨光等[31]计算所得的月河多年平均径流量数值相同。除此之外，在本研究所得的数量和过程均相似的6组相似年组中，各年组时段内研究区径流量均对人类活动产生了不同程度的响应，且年组2（1975—2016年）时段内8月径流量对人类活动的响应程度最大。

土地利用/覆被变化对区域生态、水文过程有着显著的影响，会引起流域土壤状况、地表产水量、土壤侵蚀量等的变化[32]，是影响流域径流变化的直接因素。研究表明，相对于草地而言，林地面积的增加有减弱径流的作用，耕地的扩张会导致土壤入渗率的降低和径流的增加[33]；窦小东等[27]研究发现，耕地、林地、草地三者对径流增加的贡献大小顺序为：耕地>草地>林地。耕地和林地是月河流域主要的土地利用类型，在研究时段内有26.2%的耕地转化为林地，耕地转化为林地的面积远高于林地转化为耕地的面积，除此之外还有57.0%的草地转化为了林地。这一系列不同土地利用类型的转化均对月河流域的径流产生了抑制作用。

植被是流域水循环过程的重要环境因子之一，对流域水分运移具有重要驱动作用，亦对流域产流和汇流有着调节作用。而植被覆盖度的变化很大程度上受到人类活动的制约。研究区域植被变化对径流变化的影响以及对人类活动的响应对区域水资源规划与管理具有重要的科学意义和实际价值。杨洁等[34]发现，植被覆盖度的增加导致延河流域年径流量和年径流系数明显减小；张建云等[35]证明了黄淮海流域植被覆盖条件改善对径流有削弱作用，流域NDVI增加时径流量会相应地减少。本研究将统计得到的月河流域年组内径流量的变化趋势与NDVI的变化特征结合分析，发现在相同气候条件下研究区流域内径流量整体年际变化趋势与NDVI年际变化趋势相反，进一步验证了人类活动是月河流域内径流量变化的主要原因。

本研究所用的方法在描述机制方面存在不足之处，若结合能够检验分析结果可靠性的评价指标体系，就可以更好地分析研究区内径流量的变化特征以及其影响因子。研究所确定的相似年组的年际降雨量和年际潜在蒸发量数值相对集中。以降雨量为例，研究所得的6组相似年组降雨量范围在829.8~1159.3 mm之间，主要代表丰水年和平水年两种气候类型，相似年组中缺少能够代表枯水年气候类型的年份。同时，若能结合土地利用数据分析月

河流域的潜在蒸发量、地表植被覆盖类型、土壤的入渗对径流量变化的影响情况，本文就能够更好地解释流域产流的情况。除此之外，由于人类因素较为复杂，所以本文把人类活动作为一个整体来考虑，没有对人类活动进行区分。人类活动如工程建设和农业生产等对下垫面的改变，还有诸如经济社会结构调整等，这些影响因子相互耦合，关系较为复杂。因此，如何进一步量化不同人类活动对径流变化的影响仍然是目前研究所面临的难题。

4 结 论

本研究基于1960—2018年月河流域7个气象站点的气象数据以及长枪铺水文站的径流资料，结合LUCC和NDVI的变化分析了在相似气候的前提下研究区径流量变化对人类活动的响应程度，得出如下结论：

（1）月河流域1960—2018年的降雨量和潜在蒸发量在年内分配不均，年际降雨量呈现出不显著的增加趋势，年际潜在蒸发量呈现出不显著的减少趋势。在研究时段内月河流域年径流量呈现出不显著的减少趋势，且径流量年际变化较大。

（2）月河流域径流量变化同时受到气候变化和人类活动的影响，在相似气候的前提下可以较好地描述人类活动对月河流域径流作用机制的实际情况。在研究得到的数量和过程均相似的6组相似年组中，相似年组2（1975—2016年）时段内月河流域径流量的变化幅度最大，说明在该时段内人类活动对研究区径流量变化的影响最明显。

（3）在相似气候条件下，发现月河流域径流量的变化与人类活动之间存在密切联系。月河流域径流量在2000—2016年减少了4.7×10^8 m^3，整体呈现出减少的趋势。在相应时段内，分别有25751.4 hm^2的耕地、2106.4 hm^2的草地和1088.9 hm^2的灌木转化为了林地，林地面积增加迅速。NDVI整体呈现出增加的趋势，增加的面积为242652.0 hm^2，月河流域径流量的年际变化与NDVI年际变化趋势相反。研究结果进一步量化了人类活动对月河流域径流量变化的不同程度的影响。

参考文献（References）：

[1] 夏军, 石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 292-301. [Xia Jun, Shi Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 292-301.]

[2] Wagener T, Sivapalan M, Troch P A, et al. The future of hydrology: An evolving science for a changing world[J]. Water Resources Research, 2010, 46(5): W05301.

[3] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. 中国水利, 2008(2): 55-58. [Wang Guoqing, Zhang Jianyun, Liu Jiufu, et al. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff[J]. China Water Resources, 2008(2): 55-58.]

[4] Mu Xingmin, Zhang Lu, Mcvicar T R. Analysis of the impact of conservation measures on stream flow regime in catchments of the Loess Plateau,China[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(16): 2124-2134.

[5] Bao Zhenxin, Zhang Jianyun, Wang Guoqing, et al. Attribution for decreasing stream flow of the Haihe River basin,northern China: Climate variability or human activities?[J]. Journal of Hydrology, 2012, 460-461: 117-127.

[6] 郭文献, 赵瑞超, 付体江, 等. 乌江流域水沙变化趋势及驱动力分析[J]. 人民长江, 2021, 52(9): 71-78. [Guo Wenxian, Zhao Ruichao, Fu Tijiang, et al. Trend and driving force of water-sediment changes in Wujiang River Basin[J]. Yangtze River, 2021, 52(9): 71-78.]

[7] 郭爱军, 畅建霞, 黄强, 等. 渭河流域气候变化与人类活动对径流影响的定量分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 212-220. [Guo Aijun, Chang Jianxia, Huang Qiang, et al. Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on runoff change in Weihe Basin[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2014, 42(8): 212-220.]

[8] 马柱国. 黄河径流量的历史演变规律及成因[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1270-1275. [Ma Zhuguo. Historical regular patterns of the discharge in the Yellow River and the cause of their formation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(6): 1270-1275.]

[9] 陈丽丽, 莫淑红, 巩瑶. 基于Budyko弹性系数法的佳芦河流域径流变化归因识别[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(1): 110-116. [Chen Lili, Mo Shuhong, Gong Yao. Attribution identification of runoff change in Jialu River Basin based on Budyko elastic coefficient method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(1): 110-116.]

[10] 田扬, 肖桂荣. 基于CMADS驱动下SWAT模型的敖江流域径流模拟[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(11): 27-32. [Tian Yang, Xiao Guirong. Runoff simulation for Aojiang River Basin using SWAT model driven by China Meteorological Assimilation Driving Datasets[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(11): 27-32.]

[11] 顾冉浩, 王文, 郭富雄, 等. 分项调查与水文模型相结合的九龙江流域天然径流量计算[J]. 水文, 2021, 41(2): 38-44. [Gu Ranhao, Wang Wen, Guo Fuxiong, et al. Reconstruction of natural run-

off in the Jiulong River Basin based on the combined use of the runoff component investigation method and hydrological modelling [J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(2): 38–44.]

[12] 段亮亮, 满秀玲, 俞正祥, 等. 森林干扰对大兴安岭北部森林小流域径流情势的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1421–1430. [Duan Liangliang, Man Xiuling, Yu Zhengxiang, et al. The effects of forest disturbance on flow regimes of a small forested watershed in northern Daxing'anling, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1421–1430.]

[13] Yang Hanbo, Yang Dawen, Hu Qingfang. An error analysis of the Budyko hypothesis for assessing the contribution of climate change to runoff[J]. Water Resources Research, 2014, 50(12): 9620–9629.

[14] 彭涛, 梅子祎, 董晓华, 等. 基于Budyko假设的汉江流域径流变化归因[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(6): 1114–1124. [Peng Tao, Mei Ziyi, Dong Xiaohua, et al. Attribution of runoff changes in the Hanjiang River basin based on Budyko hypothesis [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1114–1124.]

[15] Zhao Fangfang, Zhang Lu, Xu Zongxue, et al. Evaluation of methods for estimating the effects of vegetation change and climate variability on streamflow[J]. Water Resources Research, 2010, 46: 1–14.

[16] 王飞, 穆兴民, 李锐, 等. 相似性降水条件下北洛河水沙变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(6): 36–40. [Wang Fei, Mu Xingmin, Li Rui, et al. Change characteristic of the runoff and sediment under the similar precipitation condition in the Beiluohe River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(6): 36–40.]

[17] 喇路. 安康市月河流域水资源优化配置研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019. [La Lu. Study on Optimal Allocation of Water Resources in Yue River Basin of Ankang City[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.]

[18] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907–3925.

[19] 燕慧婷, 王飞, 何毅, 等. 人类活动对黄河河源区水沙变化影响评价[J]. 泥沙研究, 2015(2): 40–46. [Yan Huiting, Wang Fei, He Yi, et al. Impact assessment of human activities on runoff and sediment between paired years with similar weather condition in the source of the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2015 (2): 40–46.]

[20] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56[M]. FAO, 1998: 56.

[21] Wang Fei, Mu Xingmin, Hessel R, et al. Runoff and Sediment load of the Yan River, China: Changes over the last 60 yr[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(7): 2515–2527.

[22] 王群星. 基于相似气候特征分析的人类活动对延河流域水沙变化的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010. [Wang Qunxing. Influence of Human Activities on Runoff and Sediment Change in Yanhe River Basin Based on Analysis of Similar Climate Characteristics[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010.]

[23] 刘芳, 熊伟, 王彦辉, 等. 基于LUCC的泾河流域景观格局与径流的响应关系[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(1): 137–142. [Liu Fang, Xiong Wei, Wang Yanhui, et al. Relationship between landscape pattern and runoff based on LUCC in Jinghe river watershed[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(1): 137–142.]

[24] 牛乐乐, 张必成, 贾天忠, 等. 青海省海西州土地利用变化强度分析与稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 152–159. [Niu Lele, Zhang Bicheng, Jia Tianzhong, et al. Analysis on intensity and stability of land use change in Haixi Mongolian and Tibetan Autonomous Prefecture of Qinghai Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 152–159.]

[25] 乌义汉, 秦富仓, 郭月峰, 等. 奈曼旗土地利用动态及其生态系统服务功能[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 321–328, 345. [Wu Yihan, Qin Fucang, Guo Yuefeng, et al. Land use dynamics and ecosystem service founction in Naiman Banner[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 321–328, 345.]

[26] 秦莉俐, 陈云霞, 许有鹏. 城镇化对径流的长期影响研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2005(3): 279–285. [Qin Lili, Chen Yunxia, Xu Youpeng. A research of long-term impact on runoff in urbanized areas[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 2005(3): 279–285.]

[27] 窦小东, 黄玮, 易琦, 等. LUCC及气候变化对澜沧江流域径流的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4687–4696. [Dou Xiaodong, Huang Wei, Yi Qi, et al. Impacts of LUCC and climate change on runoff in Lancang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 39(13): 4687–4696.]

[28] 张晓龙, 黄领梅, 沈冰. 秦岭南北典型流域径流特征及其降水变化响应[J]. 水电能源科学, 2015, 33(1): 11–14. [Zhang Xiaolong, Huang Lingmei, Shen Bing. Characteristics of runoff and its responses to rainfall change in typical basins of northern and southern regions of Qinling Mountains[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(1): 11–14.]

[29] He Yi, Qiu Haijun, Song Jinxi, et al. Quantitative contribution of climate change and human activities to runoff changes in the Bahe River watershed of the Qinling Mountains, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 51(1–3): 101729.

[30] 孙艳玲, 郭鹏. 1982—2006年华北植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 7–12. [Sun Yanling, Guo Peng. Variation of vegetation coverage and its relationship with climate change in north China from 1982 to 2006[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(1): 7–12.]

[31] 杨晨光, 柯腾飞, 杨传友, 等. 月河长枪铺(三)站流量间测分析[J]. 陕西水利, 2021(10): 45–48. [Yang Chenguang, Ke Tengfei, Yang Chuanyou, et al. Analysis of flow measurement between Yuehe changjiangpu (three) station[J]. Shaanxi Water Resources, 2021

(10): 45–48.]

[32] 邓慧平. 气候与土地利用变化对水文水资源的影响研究[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 436–441. [Deng Huiping. Impacts of climate change and land use-land cover change on hydrology and water resources[J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(3): 436–441.]

[33] 张晔, 侯精明, 龚佳辉, 等. 1980–2020年渭河中上游流域土地利用演变及其对径流的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 231–237, 246. [Zhang Ye, Hou Jingming, Gong Jiahui, et al. Land use evolution and its impact on runoff response in middle and upper reaches of Weihe River Basin during 1980–2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 231–237, 246.]

[34] 杨洁, 金继明, 邵进, 等. 黄土高原中部典型流域植被恢复对径流的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 258–266, 257. [Yang Jie, Jin Jiming, Shao Jin, et al. Vegetation restoration and its impact on runoff in typical areas of middle Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 258–266, 257.]

[35] 张建云, 张成凤, 鲍振鑫, 等. 黄淮海流域植被覆盖变化对径流的影响[J]. 水科学进展, 2021, 32(6): 813–823. [Zhang Jianyun, Zhang Chengfeng, Bao Zhenxin, et al. Analysis of the effects of vegetation changes on runoff in the Huang-Huai-Hai River basin under global change[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(6): 813–823.]

Analysis of impact of human activities on runoff changes in Yue River Basin of the Qinling Mountains

DUAN Yujia[1,2], HE Yi[1,2], ZHAO Jie[1,2], WU Qiong[1,2]

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, Shaanxi, China)

Abstract: Climate change and human activities are the main driving forces of river runoff variation. Under the similar weather condition (SWC), human activities are the dominant factors for change of discharge in the basin that quantitative identification on the action mechanism of human activities on runoff change has great significance to further explore the change characteristics of runoff. This study was conducted in the Yue River basin of the Qinling Mountains. Combined with Land-Use and Land-Cover Change (LUCC) as well as Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), human activities' impacts on runoff is quantified by analyzing runoff changes in the Yue River basin with similar weather condition. The results show that: the average runoff value from 1960 to 2018 is 8.3×10^8 m^3. The discharge shows a decreasing trend as a whole, and the change trend is not significant. Under the similar weather condition, this research obtains 6 paired-years. Among them, the annual runoff of 3 paired-years increased and that of 2 paired-years decreased. Taking the third paired-year (2000 and 2016) as an example to quantitatively distinguish the impact of climate change and human activities on runoff which reduced by 4.7×10^8 m^3 in 2016 compared with 2000. In the third paired-year (2000 and 2016), 25751.4 hm^2 of arable land was converted into forest land, and the forest land area increased by 24998.9 hm^2. The NDVI change is mainly caused by human activities. The area increased by NDVI in 2016 was 242652.0 hm^2 compared with that in 2000. The change trend of NDVI is opposite to that of runoff. This study can provide a theoretical basis for quantitative evaluation for human activities' impact on river runoff changes within the Qinling Mountains.

Keywords: Yue River Basin; human activities; similar weather condition; LUCC; NDVI